

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Ефимова Евгения Александровича

«Моделирование волновых движений в структурно-неоднородных средах блочного строения в пространственной постановке», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности

1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

Актуальность.

Одним из основных направлений развития механики деформируемого твердого тела на современном этапе является направление, связанное с детальным учетом внутренней структуры среды в процессах ее деформирования. На первый план выступают задачи, где необходимо учитывать эффекты проявления внутренней структуры среды: влияние зеренной структуры металлов и сплавов, особенности поведения структурных элементов конструкций. Огромное значение данные вопросы приобретают в задачах механики гранулированных сред, грунтов и горных пород, где структурная неоднородность предопределяет все основные свойства геоматериалов – внутреннее трение, сцепление, дилатансию, анизотропию и др. Блочное строение горных пород и наличие трещин, заполненных более слабыми породами или флюидами, играют ключевую роль при расчете напряженно-деформированного состояния породных массивов, анализе устойчивости подземных сооружений, расчете параметров динамических возмущений (сейсморазведка) и т.д.

На основании изложенного можно заключить, что тематика диссертационного исследования Ефимова Е.А., посвященная моделированию волновых движений в блочных средах с внутренней структурой, является актуальной.

Диссертация состоит из введения, обзора литературы, трех глав, заключения, приложения и списка использованной литературы из 188 наименований. Диссертация изложена на 136 страницах машинописного текста, включая 49 рисунков и 10 таблиц.

Во введении обосновывается актуальность и степень разработанности выбранной темы исследования, указаны цели и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Дано описание новизны, теоретической и практической значимости полученных выводов, приведено обоснование их достоверности, сведения об апробации работы, о личном вкладе и публикациях автора, о соответствии диссертации паспорту научной специальности.

В обзоре литературы приведены сведения о современных достижениях и актуальных публикациях по теме диссертационной работы. Приведен обзор источников по анализу структурно-неоднородных и блочных сред. Описаны основные подходы к построению математических моделей блочных сред, включая сложные композиционные материалы, а также грунты и горные породы. Отмечено, что одним из приоритетных направлений в данной области является описание сред с многоуровневой иерархической структурой. Сформулированы основные подходы к построению моделей, описывающих динамические процессы в геосредах с затуханием динамических возмущений.

Вторая часть обзора посвящена описанию работ по теме численной реализации методов решения динамических задач. Описаны различные подходы и разностные схемы, дано описание порядка их аппроксимации и сходимости. Указаны способы

задания краевых условий, в том числе, условий поглощения волн и слабоотражающих граничных условий.

Первая глава посвящена формулировке пространственной математической модели слоисто-блочных сред, представленных набором регулярных однородных блоков с прослойками на межблочных границах. Предложено блоки моделировать уравнениями теории упругости, а для межблочных прослоек ввести уравнения в виде внутренних граничных условий для блоков. Показано, что предложенная модель является корректной с точки зрения выполнения закона сохранения энергии.

Получено решение для распространения плоских монохроматических волн. Показано, что сформулированная модель адекватно описывает волновые процессы в средах с тонкими податливыми прослойками и пригодна для описания длинноволновых процессов.

Для численного решения задач динамики предложено использовать схему расщепления по пространственным координатам. Рассмотрены и реализованы два алгоритма: первый – на основе метода Годунова, второй – с использованием разностной схемы Иванова Г.В. со схемной вязкостью. Данные алгоритмы реализованы в виде комплекса компьютерных программ по решению пространственных динамических задач распространения волн с применением параллельных высокопроизводительных вычислительных систем кластерной архитектуры.

Численно решена задача Лэмба о точечном динамическом возмущении блочно-слоистого полупространства. Приведены решения в зависимости от толщины и от степени податливости прослоек. Установлено, что увеличение толщины прослоек, равно как и степени их податливости, приводит к увеличению амплитуды и периода возмущений. Полученное решение, в целом, стремится к решению аналогичной задачи на основе дискретно-периодической модели блочной среды.

Во второй главе описан подход к моделированию прослоек со сложными реологическими свойствами. Рассмотрены случаи моделирования вязкоупругих, упругопластических и пористых прослоек. В случае вязкоупругих прослоек деформация объема предполагается упругой, а реологические свойства описываются девиатором тензора напряжений. Упругопластическое поведение моделируется вариацией напряжений в прослойках в соответствии с принципом максимума Мизеса и заданием условия текучести. Пористые прослойки моделируются с учетом разномодульности материала на растяжение и сжатие и эффектом уплотнения межблочного материала.

Приведен анализ добротности вязкоупругой среды, описан численный метод решения задач с учетом вязкоупругих прослоек.

Проведено сравнение численных результатов по распространению волн в блочной среде с упругими блоками и вязкоупругими прослойками с данными лабораторных экспериментов, известным по литературным источникам. Сравнение результатов показало, в целом, удовлетворительное соответствие. Определенное расхождение наблюдалось для ускорения в поперечном направлении модели, что связано, по мнению автора, с неточным соответствием расположения акселерометров в лабораторном и численном экспериментах.

Численно решена задача о влиянии заглубленного упругопластического включения в блочном полупространстве на процесс распространения динамических

возмущений. Даны оценки влияния параметров модели на характер деформаций в блочной среде и во включении.

Третья глава посвящена исследованию волновых полей от импульсного сейсмоисточника в однородных и блочных средах. Расчеты проводились для грунтовых сред. Получены оценки влияния длительности импульсного воздействия и размеров площадки его приложения. Исследованы характеристики распространения волн при вариации свойств прослоек. Установлено, что рост податливости упругих прослоек влечет снижение амплитуд высокочастотной части спектра. При удалении от источника сигнала высокочастотные колебания затухают.

При решении задачи с упругопластическим включением показано, что различие динамических сигналов в среде с включением и без него становится менее выраженным по мере увеличения толщины и степени податливости прослоек.

В заключении приведены основные результаты и выводы, соответствующие положениям, выносимым на защиту.

В приложении приведена копия Свидетельства о государственной регистрации разработанной автором программы для ЭВМ, на основе которой проведены все численные расчеты.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования обеспечивается корректным применением фундаментальных законов механики деформируемого твердого тела, апробированных методов и подходов, использованием современных вычислительных методов, верификацией полученных численных решений на тестовых (известных) решениях, сравнением полученных результатов с данными лабораторных измерений.

Научная новизна полученных результатов.

- В работе на основе модели блочно-слоистой среды с тонкими прослойками разработан оригинальный программный комплекс решения пространственных задач распространения динамических возмущений. В программном комплексе предусмотрен учет иерархии структурных уровней среды и различных свойств прослоек (вязкоупругие, упругопластические, пористые). Программный комплекс разработан с применением алгоритмов параллельных вычислений кластерной архитектуры.
- Получено решение задачи об отражении и преломлении плоских монохроматических волн в блочной среде с тонкими упругими прослойками, моделируемым заданием внутренних граничных условий. Показано, что используемый подход к моделированию адекватно описывает распространение динамических возмущений в средах с тонкими и податливыми прослойками.
- Получены оригинальные численные решения задач распространения волн в блочных средах с учетом различных свойств тонких прослоек и при наличии в среде крупного упругопластического включения. Показана адекватность полученных решений, в том числе, на основе сравнения с данными лабораторных экспериментов, известных из литературных источников.
- Проведены расчеты и получены оригинальные результаты по моделированию распространения волн в структурно-неоднородных грунтовых массивах при воздействии на них единичным сейсмическим импульсом.

Значимость диссертационной работы для науки и практики.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы заключается в развитии современных методов моделирования распространения динамических возмущений в блочных средах. Результаты работы могут быть использованы при моделировании распространения волн вдоль межблочных границ, а также при определении параметров моделей структурно-неоднородных сред.

В практическом аспекте результаты диссертационной работы могут иметь значение при прямом моделировании, а также при интерпретации натурных измерений распространения сейсмосигналов в грунтовых средах и в массивах горных пород, имеющих сложную иерархическую внутреннюю структуру – практические задачи сейсморазведки.

По работе имеются некоторые замечания:

1. При моделировании упругих (сравнительно податливых) прослоек между упругими (сравнительно жесткими) блоками не приведен анализ ситуации: допускает ли указанная модель предельный переход к описанию сплошной среды в случае, когда упругие свойства блоков и прослоек совпадают.
2. При сравнении результатов расчетов с данными лабораторных экспериментов (стр. 84) выбраны отличающиеся на 35% значения модулей сдвига прослоек по различным направлениям. При этом не сказано с каким из двух экспериментов цитируемой статьи проведено сравнение (блоки с резиновыми прослойками или блоки без прослоек, когда роль прослоек выполняет шероховатость границ блоков). Необходимо дать дополнительные пояснения.
3. На стр. 55, стр. 94 при формулировке краевых условий в напряжениях и скоростях допущена неточная запись ($\sigma_{12} = \sigma_{23} = v_2 = 0$), поскольку напряжения и скорости имеют разную размерность.
4. В работе замечены некоторые опечатки и неточности: величина предела текучести σ_s в условии Мизеса (стр. 93) должна стоять во второй степени, на рис. 3.2, 3.3. (стр. 102, 103) не указано, что отложено по осям координат, стр. 114 и 115 переставлены между собой местами.
5. В списке литературных источников в ряде ссылок (например, 5, 6, 7, 8) не приведены номера выпусков журналов, указаны только год выпуска, том (если он есть) и страницы.

Сделанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертации.

Квалификационная оценка работы.

Диссертация представляет собой законченную научную квалификационную работу, в которой предложены методы моделирования и решен ряд задач распространения волн в неоднородных слоисто-блочных средах с учетом различных свойств межблочных прослоек.

Полученные в диссертации результаты являются новыми. Работа имеет теоретическую и практическую значимость. Диссертация оформлена в соответствии с предъявляемыми требованиями, автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертационного исследования Ефимова Е.А. позволяют заключить, что в работе решена задача, имеющая существенное значение для развития механики деформируемого твердого тела в части математического моделирования поведения

неоднородных блочных сред, в том числе, обладающих иерархией структурных уровней, при динамическом нагружении.

Тема, поставленные задачи, использованные методы и полученные результаты в диссертационной работе Ефимова Е.А. соответствует пп. 1, 3, 5, 6, 8, 11, 12 паспорта специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 работах, в том числе 6 статей в журналах, включенных в Перечень ВАК, где должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 2 статьи – в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus. Получено Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты работы были доложены на ряде ведущих Российских и международных научных конференций.

Заключение.

Диссертационная работа Ефимова Евгения Александровича соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

Заместитель директора по научной работе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук, доктор физико-математических наук (01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), старший научный сотрудник



Лавриков Сергей Владимирович

05 февраля 2026 года

Подпись С.В. Лаврикова удостоверяю
Ученый секретарь ИГД СО РАН

К.Т.Н.



К.А. Коваленко

Данные об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук
630091, Новосибирск, Красный проспект, 54,
Тел: +7 (383) 205-30-30;
admin@misd.nsc.ru;
<http://misd.ru/>